

Diagnostic et mise en sécurité du barrage de Songloulou au Cameroun vis à vis des désordres liés à l'alcali-réaction

Safety assessment and upgrading of Songloulou dam in Cameroon towards alkali-reaction disorders

Thibaut Guillemot
ISL Ingénierie, 29 rue Maurice Flandin, 69 003 Lyon, France
guillemot@isl.fr

Michel Lino
ISL Ingénierie, 15 rue du Maréchal Harispe, 64 500 Saint-Jean-de-Luz, France
lino@isl.fr

Emmanuel Nzalli
AES SONEL, Douala, Cameroun
emmanuel.nzalli@aes.com

MOTS CLÉS

Béton, gonflement interne, stabilité, réhabilitation, confortement, auscultation, précontrainte, injection, géomembrane, fusible, évacuateur, prise d'eau, vannes, équipements hydromécaniques.

RÉSUMÉ

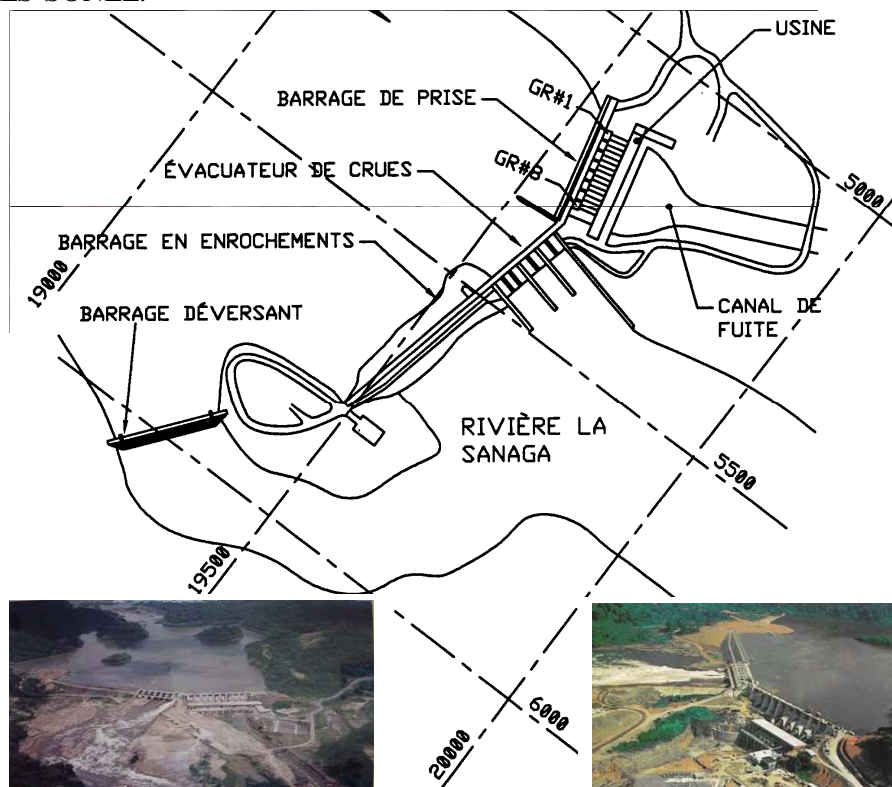
Diagnostic et mise en sécurité du barrage de Songloulou au Cameroun vis-vis des désordres liés à l'alcali-réaction
Le barrage de Songloulou, principal aménagement hydroélectrique du Cameroun avec une puissance installée de 384 MW, a été construit entre 1976 et 1981 et a rapidement connu de sérieux désordres liés à l'alcali-réaction du béton. L'exploitant a confié à ISL, assisté de l'IFSTTAR, la réalisation d'un diagnostic et la définition d'un programme de réhabilitation du barrage. Cette étude a montré qu'une rupture ou un grave dysfonctionnement des ouvrages en béton ou des équipements de la prise d'eau et de l'évacuateur n'étaient pas à exclure si aucun confortement n'était entrepris. Bien que les réactions de gonflement du béton à l'origine de ces conclusions semblent être en fin d'activité, les ouvrages se trouvent actuellement dans un état fortement dégradé et en limite de stabilité. Un programme de réhabilitation d'envergure a été conçu, avec pour objectif de pouvoir exploiter en toute sécurité l'usine pendant une période supplémentaire d'au moins 50 ans. Les travaux définis s'étalent sur 9 ans en raison des contraintes d'exploitation de l'usine et de l'évacuateur. Leur coût est estimé à 110 M€. De plus, ces travaux ont un impact significatif sur la production : pendant 8 ans, un groupe sur huit devra être arrêté en permanence, par rotation d'un groupe par an. La perte de production qui en résulte est estimée à un coût équivalent à celui des travaux.

ABSTRACT

Safety assessment and upgrading of Songloulou dam in Cameroon towards alkali-reaction disorders
Songloulou dam, the main hydroelectric scheme of Cameroon with an installed capacity of 384 MW, has been erected between 1976 and 1981 and has soon faced serious disorders due to concrete alkali-reaction pathology. The owner assigned ISL, assisted by IFSTTAR, to assess the dam safety and define a rehabilitation program. This assessment showed that a dam failure or serious malfunctions of the hydromechanical equipments could occur if no upgrading works were undertaken. Although concrete swellings at the origin of these conclusions seem to be reaching an end, the structures are nowadays strongly affected and near to their stability limit. An important rehabilitation program has been designed, with the aim of operating the dam and the power plant for at least 50 more years. The works are planned to last for 9 years, because of operating considerations of the power plant and the spillway. Their cost is estimated to M€ 110. These works also have a strong impact on the power generation : during eight years, one unit over eight will have to be continuously stopped. The total production loss reaches an amount estimated close to the rehabilitation program cost.

1. INTRODUCTION

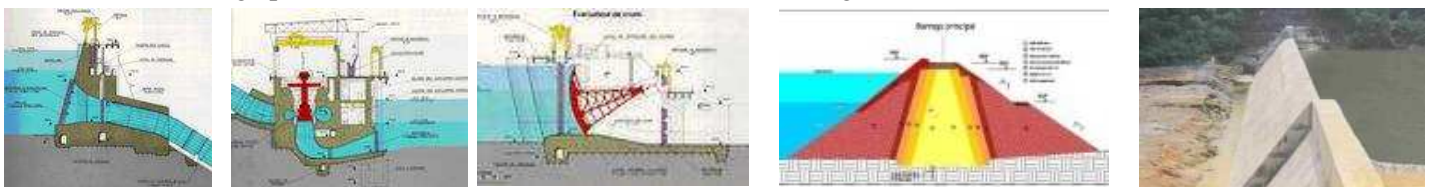
L'aménagement hydroélectrique de Songloulou est construit sur le fleuve Sanaga. La superficie du bassin versant est de 130 000 km² au droit du barrage. Le module interannuel est de 2 000 m³/s, avec les débits de crues suivants : $Q_{10} = 7\,400$ m³/s, $Q_{100} = 8\,000$ m³/s, $Q_{1\,000} = 8\,890$ m³/s et $Q_{10\,000} = 9\,830$ m³/s. Le Maître d'ouvrage est AES-SONEL.



Graphique 1 : Vue en plan et photographies aériennes de l'aménagement

Le volume de retenue est de 10 hm³ et le barrage est un ouvrage composite dont les principaux éléments sont, de la rive gauche vers la rive droite :

- un barrage en béton à contreforts pour les prises d'eau, de 225 m de longueur et 35 m de hauteur, traversé de huit pertuis de 13,50 m de largeur, puis de conduites forcées de 6,40 m de diamètre, avec une usine de pied équipée de huit groupes Francis de 48 MW de puissance nominale (débit de 130 m³/s par turbine pour une chute nette de 41,5 m),
- un évacuateur de crue composé de sept passes obturées par des vannes secteurs à clapets, de dimensions $l = 14$ m x $h = 17,25$ m, de 135 m de longueur totale et de 20 m de hauteur,
- un barrage zoné en enrochements à noyau central en argile latéritique séparé des recharges par des filtres en sable et gravillons, de 300 m de longueur et 27 m de hauteur,
- un barrage poids en béton à seuil déversant de 200 m de longueur et 8 m de hauteur.



Graphique 2 : Vues des différents composants de l'aménagement, barrage de prise, usine, évacuateur de crue, barrage en enrochement et barrage déversant

Des phénomènes de gonflement des bétons ont été identifiés six ans après la mise en service des premiers groupes (1981) par la réduction des jeux entre les pièces fixes et mobiles des turbines et alternateurs. Depuis, les gonflements ont eu diverses conséquences problématiques pour l'exploitation et la sécurité des ouvrages : manipulations difficiles, voire blocages des vannes et batardeaux de l'évacuateur et de la prise d'eau, apparition de fissures plus ou moins ouvertes sur les parements de béton, déformation des pièces fixes...

Depuis 1991, la SONEL, puis AES-SONEL, ont engagé une série d'études visant à évaluer et à améliorer la sécurité des ouvrages, ainsi qu'une série d'interventions pour contrer les effets du gonflement sur les équipements (groupes turbines-alternateurs, vannes et batardeaux).

L'étude confiée à ISL, assisté de l'IFFSTAR, consiste en l'analyse de l'état sécuritaire de l'aménagement, la définition d'un programme de réhabilitation et le chiffrage des travaux pour consolider les structures affectées par les réactions de gonflement, rétablir des conditions d'exploitation des équipements satisfaisantes et proposer un renforcement de l'auscultation pour le suivi des ouvrages.

2. AVIS D'URGENCE

La première phase de l'étude a consisté en la réalisation d'un diagnostic rapide et la production d'un avis d'urgence afin de pouvoir détecter toute anomalie et la gérer du mieux possible pendant la phase de réalisation de l'étude et les travaux de confortement. Cette première phase a consisté en :

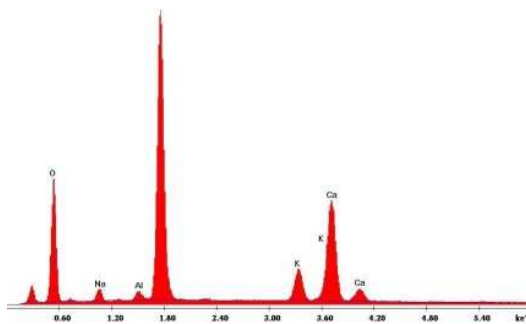
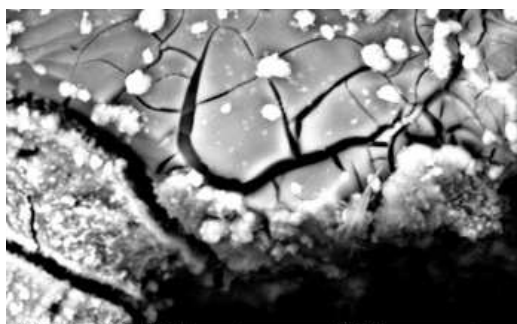
- proposer la mise en place de dispositifs de détection (auscultation, inspections visuelles) et d'alerte des signes précurseur d'une rupture du barrage,
- proposer la mise en place d'un Plan Particulier d'Intervention en cas de rupture du barrage.

3. ETAT SECURITAIRE ET RISQUES

Cette mission comporte une analyse critique des études antérieures, le prélèvement d'échantillons de béton sur les ouvrages et la réalisation d'essais permettant de caractériser l'état actuel du béton (évolution des pathologies, résistance...), des inspections détaillées des ouvrages, y compris inspections subaquatiques des parties immergées), le recueil des observations de l'exploitant et du personnel en charge de l'auscultation du barrage, l'analyse détaillée des données d'auscultation disponibles, l'appréciation des travaux de correction déjà réalisés par AES-SONEL, une étude de l'aléa sismique et de la capacité d'évacuation des crues, un diagnostic structurel détaillé sur les ouvrages, une analyse de risques permettant de classer les modes de rupture par ordre de criticité. On expose ci-dessous les principales conclusions de ces investigations.

3.1 Pathologies des bétons

Les essais de laboratoire réalisés par l'IFSTTAR entre 2009 et 2011 sur les carottes prélevées au barrage confirment que le béton du barrage de Songloulou souffre d'une pathologie sévère qui se traduit par un gonflement du matériau. Les essais d'identification ont montré une prépondérance de l'alcali-réaction sur la réaction sulfatique interne dans les échantillons analysés.

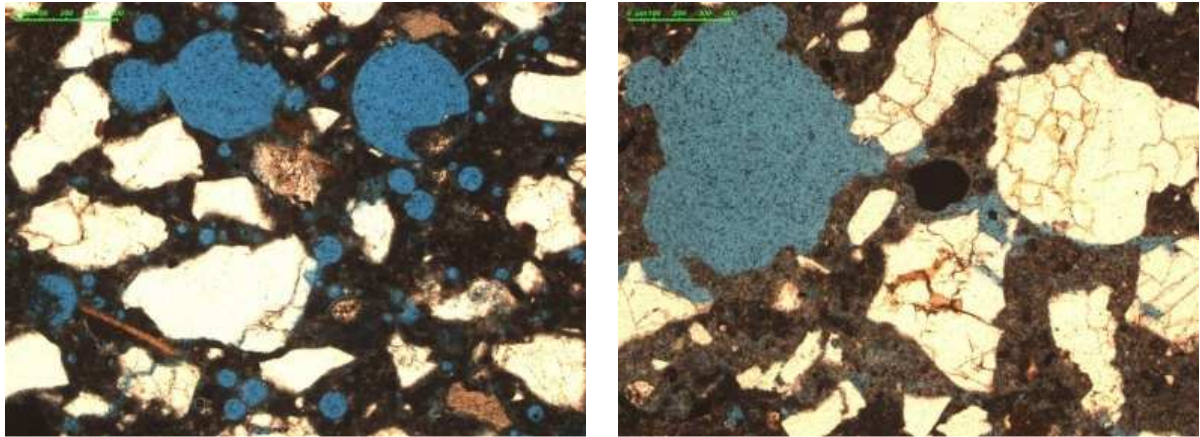


Graphique 3 (source : IFSTTAR) : Surface de rupture d'un des échantillons : produit de réaction ayant une morphologie amorphe, et une composition silico-calco-alcaline

La campagne d'analyse des bétons a montré que la résistance à la compression du béton était encore assez élevée et en majorité supérieure aux résistances spécifiées au moment de la construction. La résistance moyenne mesurée est de 23 MPa.

Le module d'élasticité du béton est faible, en moyenne 12 GPa. Ces valeurs de module ne sont pas en rapport avec les résistances en compression mesurées et traduisent un endommagement par fissuration de la matrice, ou une porosité anormale de la pâte de ciment. Ces points ont effectivement été constatés dans

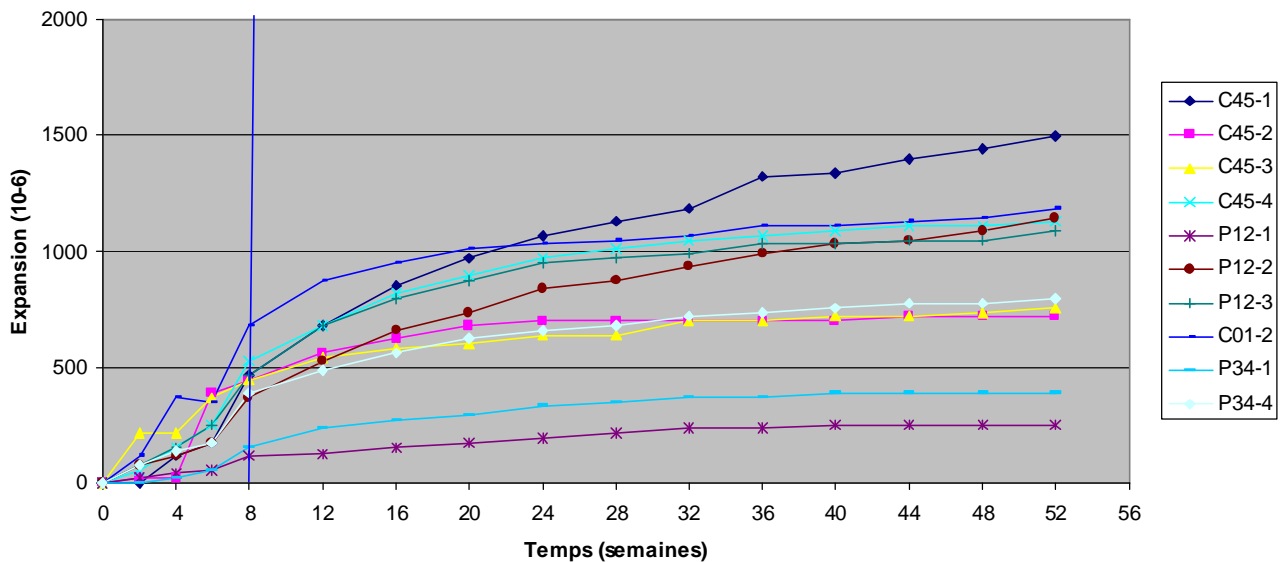
les observations d'échantillons et les mesures de porosité, avec des valeurs de porosité globale du béton entre 15 et 18%, essentiellement dues à la matrice cimentaire.



Graphique 4 (source IFSTTAR) : Grossissement d'échantillons x50. A gauche, image centrée sur le liant où la porosité (en bleu) est très importante. Les diamètres de pores ont été mesurés de 18 μm à 460 μm dans une zone d'environ 2,7 mm x 2,2 mm. A droite, la porosité est par endroits de taille supérieure à celle des grains de sable (quartz). De plus les fissures traversent le liant et mettent en relation les grains de quartz et la porosité donc la solution interstitielle du béton.

Qualitativement, la réaction alcali-granulats a été jugée actuellement peu active. Les essais de gonflement résiduel permettent de se prononcer quantitativement sur le potentiel réactif du béton jusqu'à la fin de vie de l'aménagement.

D'après ces essais, les réactions de gonflement sont apparemment en fin d'activité : la durée résiduelle du gonflement est évaluée entre 2 et 10 ans, selon les carottes, au rythme actuel de $150.10^{-6}/\text{an}$ (valeur estimée par mesures de nivellement de la crête des ouvrages depuis leur mise en service). Ceci permet d'envisager des travaux de confortement structurels sur des ouvrages évoluant désormais peu.



Graphique 5 (source IFSTTAR) : Expansion résiduelle mesurée sur 10 échantillons prélevés dans le barrage

3.2 Prise d'eau

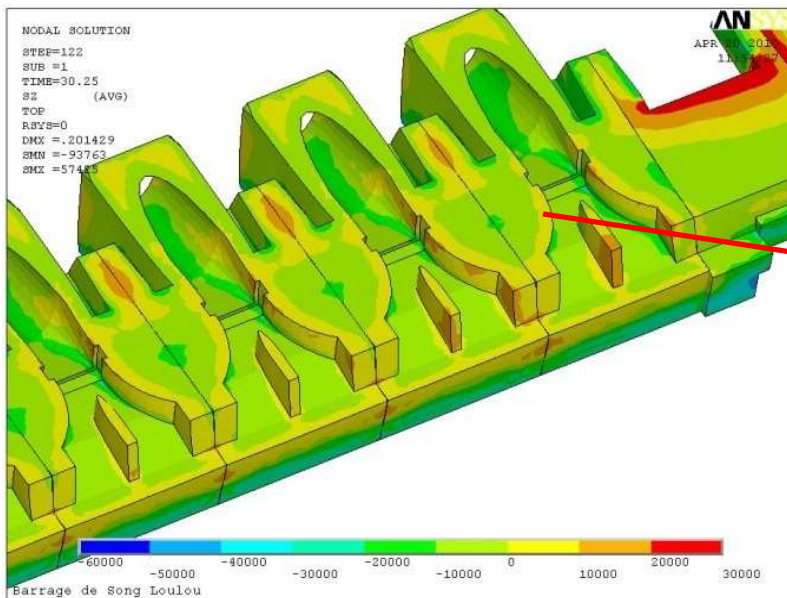
Le barrage de prise apparaît comme sérieusement affecté par les conséquences de la réaction alcali-granulats.



Graphique 6 : Vues d'ensemble du barrage de prise

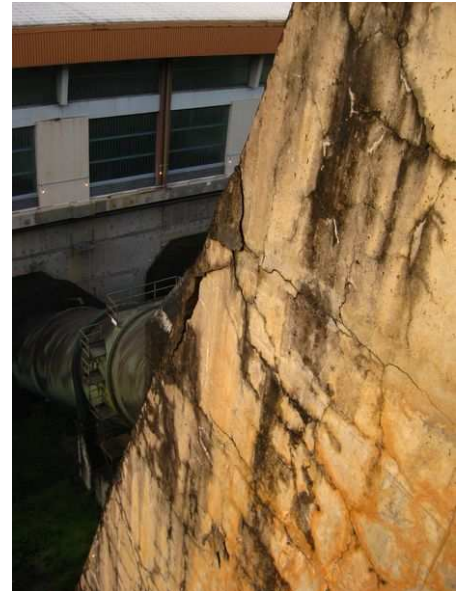
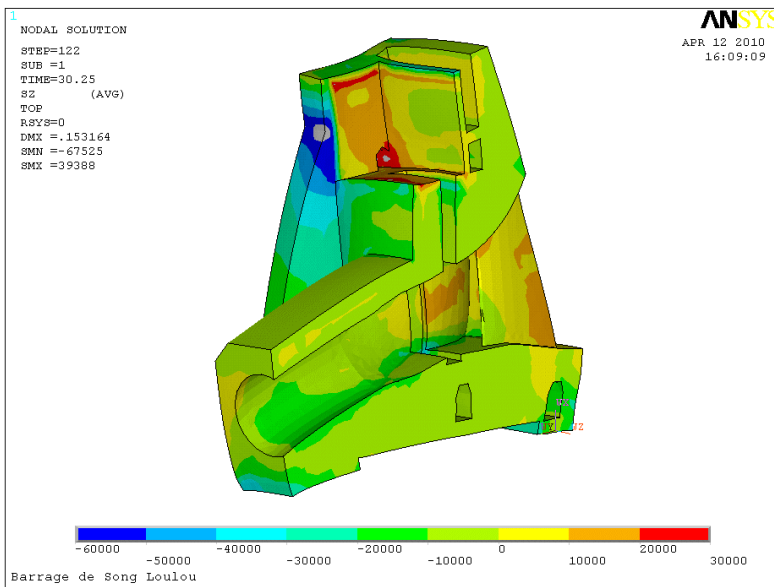
Par l'intermédiaire de calculs de structures par éléments finis prenant en compte l'historique des gonflements internes, deux mécanismes principaux de rupture ont été identifiés :

- la rupture par extension des fissures amont et augmentation des sous-pressions, favorisée par la conception des pertuis usiniers non blindés, amenant la pression de la retenue dans le corps du barrage,



Graphique 7 : Contraintes verticales actuelles dans la prise d'eau (coupe horizontale dans les pertuis). Les tractions (en jaune, orange et rouge) correspondent bien à l'état des parements fissurés observés dans les pertuis

- la rupture par écrasement des contreforts fortement comprimés par la conjonction des effets hydrostatiques et de la compression du contrefort sous l'effet des gonflements différentiels dû à la réaction alcali-granulats.



Graphique 8 : Contraintes verticales actuelles dans la prise d'eau (en bleu, les contraintes non admissibles) et aspect éclaté du béton dans la partie aval des contreforts

- la rupture du plot de jonction entre l'évacuateur et le barrage de prise, sous la poussée dans l'axe longitudinal du barrage de prise, induite par les gonflements du béton.

3.3 Evacuateur de crue

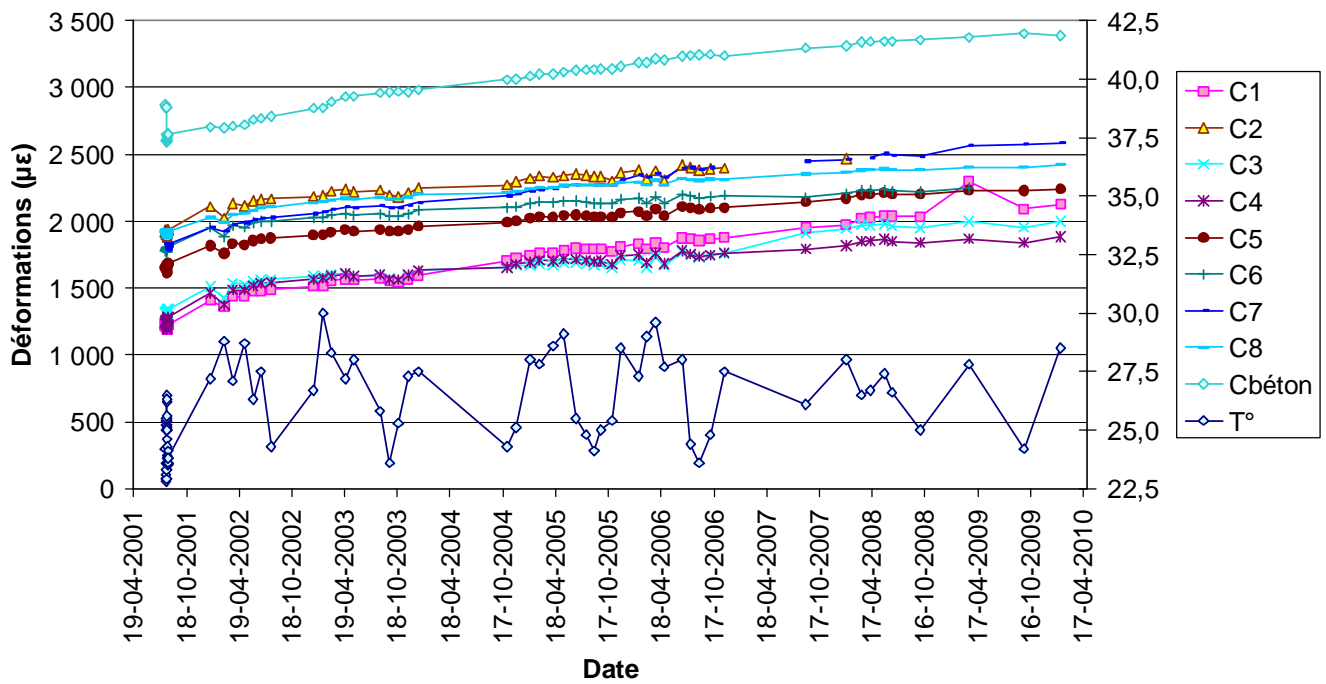
Comme le barrage de prise, l'évacuateur est fortement affecté par la réaction alcali-granulats.



Graphique 9 : Vue de deux piles de l'évacuateur de crue

Les inquiétudes sur cet ouvrage sont d'ordres structurels et fonctionnels. Le développement de l'alcali-réaction fait craindre principalement :

- la rupture des tirants passifs et actifs dans les piles servant à la reprise de la poussée des vannes, ou des déformations non maîtrisées des bétons à cause de la plastification des aciers,



Graphique 10 : Mesures des déformations des tirants de la pile rive gauche, face rive droite : le cumul des déformations sur la période 2001 et 2010, entre 0,5 et 1% est déjà proche de la limite élastique, ce qui montre que depuis la construction, la limite élastique en déformation est largement dépassée

- la rupture d'une pile suite à la diminution des caractéristiques du béton ou l'endommagement de l'ouvrage lié aux déformations (cisaillements importants en pied de pile par exemple),
- la rupture du bajoyer rive gauche sous la poussée du barrage de prise,
- le blocage ou la rupture d'une ou plusieurs vannes sous l'effet des déformations imposées par le béton, ce qui est déjà le cas pour la vanne rive gauche qui a été récemment bloquée, ce qui a nécessité la démolition du béton de deuxième phase et la réfection complète des pièces fixes avec un système réglable permettant de compenser régulièrement les déformations du béton.

3.4 Barrage déversant en béton

Le barrage déversant montre lui aussi des dégradations liées à l'alcali-réaction dans le béton constitutif de l'ouvrage. Le développement des gonflements pourrait accentuer la fissuration dans le corps de l'ouvrage ou dans la fondation, ce qui aurait pour conséquence de réduire les paramètres de résistance du béton et d'augmenter les sous-pressions, ces deux actions ayant un lien direct et défavorable sur la stabilité de l'ouvrage.



Graphique n°11 : Appui rive gauche du barrage déversant

Dans la mesure où une capacité d'évacuation des crues supplémentaire est requise pour la réalisation des travaux de confortement sur l'évacuateur, le remplacement du barrage déversant par un ouvrage fusible permettant de protéger l'aménagement contre les crues de chantier a été proposé.

4. PROGRAMME DE REHABILITATION

La définition des travaux de confortement est basée sur le diagnostic détaillé de l'état sécuritaire du barrage. Une analyse des risques a mis en évidence les désordres les plus préjudiciables en termes de probabilité d'occurrence de dommages, croisée avec la gravité de leurs conséquences.

L'analyse des risques a ainsi permis d'identifier les aléas à traiter dans le cadre d'une réhabilitation de l'aménagement. Les plus critiques sont :

- barrage de prise : rupture d'un plot par extension de la fissuration et accroissement des sous-pressions, rupture d'un contrefort par écrasement du béton, submersion induite par un blocage ou un dysfonctionnement des vannes de l'évacuateur,
- évacuateur de crue : rupture de tirants passifs ou précontraints dans les piles, écrasement du béton des consoles des vannes et blocage d'une ou plusieurs vannes, rupture des plots de jonction entre la prise d'eau et l'évacuateur ou du bajoyer rive gauche, submersion induite par un blocage ou un dysfonctionnement des vannes,
- barrage en enrochements : rupture du barrage par submersion du noyau d'argile ou de la crête pendant une crue suite à un dysfonctionnement des vannes de l'évacuateur,
- barrage déversant : rupture par écrasement du béton, extension des fissures ou glissement sur la fondation.

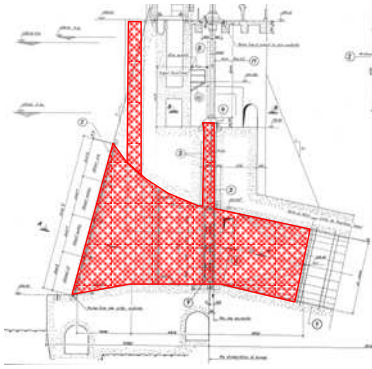
Le confortement du barrage devrait conduire à la remise à niveau des ouvrages dans un état qui permettra d'exploiter l'aménagement pendant une période d'au moins une cinquantaine d'années supplémentaires.

Les principaux travaux recommandés à l'issue des études relatives au programme de réhabilitation sont récapitulés ci-dessous par ouvrage. On ne fait apparaître ici que les travaux motivés directement ou indirectement par les pathologies du béton. Le programme de réhabilitation comprend également des travaux annexes faisant partie de l'entretien normal du barrage, qui ne sont pas mentionnés dans cet article.

4.1 Prise d'eau

Les défauts de stabilité et d'étanchéité induits par les réactions de gonflement (fissuration du parement amont et de la partie amont des contreforts, écrasement de la partie aval des contreforts) seront traités de la façon suivante :

- Colmatage par injections subaquatiques des fissures du parement amont avec une résine polyuréthane, matériau souple qui pourra s'adapter aux gonflements résiduels.
- Mise en place de géomembranes fixées mécaniquement sur la surface intérieure des pertuis pour étancher les fissures dans les prises d'eau.
- Drainage du corps du barrage par un rideau de forages dans les contreforts.
- Stabilisation des plots de la prise d'eau par précontrainte.
- Construction de nouveaux contreforts à l'aval pour palier à un éventuel écrasement des contreforts actuels.
- Repositionnement et réfection des pièces fixes des vannes et batardeaux pour compenser les déformations induites par les gonflements du béton.
- Construction d'une culée massive à la jonction entre la prise d'eau et l'évacuateur de crue, pour reprendre les efforts de poussée longitudinale de la prise d'eau et découpage du plot de jonction actuel.



Graphique n°12 : Etanchement des pertuis (photo : CARPI, tunnel hydraulique de Spalov, Tchèque), construction de nouveaux contreforts et mise en place de précontrainte

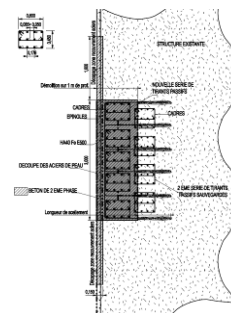
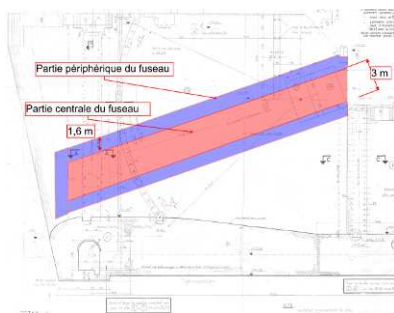
La construction de nouveaux contreforts sera confirmée après la réalisation de mesures de contraintes in situ dans les contreforts pour confirmer les résultats des calculs.

Les travaux sur la prise d'eau, qui nécessiteront l'arrêt des turbines pour l'injection des fissures, la mise en place des géomembranes et la réparation des vannes, ne pourront se faire qu'à raison d'une turbine par an, de manière à maintenir la production d'électricité à un niveau acceptable pour l'exploitant.

4.2 Evacuateur de crue et barrage déversant en rive droite

Les principaux désordres à traiter sont les plastifications des tirants de reprise des efforts des vannes et des consoles d'appui. Pour chaque pile, ces travaux nécessitent :

- La construction de deux jeux de batardeaux submersibles à disposer à l'amont de la pile et des deux piles adjacentes afin d'isoler deux passes, les deux jeux de batardeaux pouvant servir pour conforter l'ensemble des piles.
- Le démontage complet des vannes encadrant la pile. A cette occasion, les vannes et le contrôle commandent feront l'objet d'une révision et d'une réhabilitation complète.
- La démolition soignée du béton de la pile autour des tirants et la démolition des consoles d'appui des vannes.
- Le remplacement des tirants et la réparation du béton des piles et des consoles.



Graphique n°13 : Démolition du béton des piles et remplacement des tirants

Lors de la mise à sec des passes, les pièces fixes des vannes et des batardeaux feront l'objet d'une réparation complète, les structures en béton seront injectées et réparées localement et l'enduit anti-abrasion refait à neuf. Les crêtes de piles fissurées seront imperméabilisées.

Il est prévu d'intervenir sur chaque passe par cycle de deux ans, avec chevauchement des travaux sur chaque groupe de deux passes adjacente pendant un an. Soit une durée totale d'intervention de 7 ans. Pendant les travaux, la mise hors service de deux passes en permanence ne permet pas de maîtriser les crues de chantier. Pour cette raison, il est décidé de remplacer le barrage déversant en rive droite par un ouvrage fusible à clapets de capacité 2 300 m³/s sous le niveau maximal d'exploitation. Ces travaux nécessitent un dévasement préalable à l'amont du barrage déversant.

4.3 Renforcement de l'auscultation

Le programme de réhabilitation s'accompagne d'un renforcement de l'auscultation des ouvrages permettant de mieux suivre l'évolution des déformations et les conditions de stabilité des ouvrages. Il est prévu la mise en place de pendules directs et inverses, de cellules de pression en fondation, de déversoir de mesure et la remise en place du protocole de suivi topographique des ouvrages.

5. CHIFFRAGE ET ORGANISATION DES TRAVAUX

Les travaux sont programmés sur une durée de 9 ans, fixée par les contraintes d'exploitation du barrage qui imposent de ne travailler que sur une prise d'eau ou deux passes de l'évacuateur à la fois. Leur coût est estimé à près de 110 M€ hors taxes.

Les travaux ont également un impact significatif sur la production, puisque pendant 8 ans, un groupe sur huit devra être arrêté en permanence, par rotation d'un groupe par an. La perte de production qui en résulte est équivalente au coût des travaux.

La réalisation des travaux se justifie par l'importance stratégique de l'aménagement qui est la principale source d'énergie de toute la partie sud du Cameroun.

Les travaux sont divisés en sept lots (génie civil, dévasement, travaux subaquatiques, étanchement par géomembrane, précontrainte, ponts roulants et hydromécanique). Les appels d'offres pour les premiers lots de travaux devraient être lancés courant 2013.

6. CONCLUSION

En conclusion, à partir d'un ouvrage fortement affecté par la réaction alcali-granulats et actuellement en limite de stabilité, un programme de réhabilitation d'envergure a été défini. Il est en partie rendu possible par le fait que cette réaction touche à son terme, ce qui implique que les confortements des ouvrages seront peu affectés par les gonflements résiduels.

Le ciblage des reconnaissances et la mobilisation d'experts pour en faire l'analyse se sont révélés être un enjeu pour le diagnostic et une base importante pour guider la définition du programme de réhabilitation, tant sur les méthodes que sur les délais d'intervention.

Ces confortements et la réfection complète des organes hydromécaniques devraient permettre à l'exploitant et au Cameroun de bénéficier de cet aménagement pendant une période d'au moins 50 années supplémentaires.